

0-793700

На правах рукописи



**АЛФЁРОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ  
МОНОКРИСТАЛЛОВ НИКЕЛЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ  
И НЕОДНОРОДНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СЖАТИИ**

**Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Томск 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» и Юргинском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Лычагин Дмитрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Дударев Евгений Федорович  
  
доктор физико-математических наук,  
доцент  
Дервягина Людмила Сергеевна

Ведущая организация: Алтайский государственный  
университет им. И.И. Пол

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000665369

Защита состоится «22» марта 2012 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 в Национальном исследовательском Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТГУ

Автореферат разослан «16» февраля 2012г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник

Ивонин И. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для повышения эксплуатационных свойств материалов и оптимизации режимов обработки металлов давлением важным является установление характера неоднородности деформации и выявление мест ее локализации. Неоднородность и локализацию деформации наиболее подробно изучали применительно к лабораторным методам испытаний и обработке металлов давлением. Преимущественно эти исследования проводили на поликристаллических материалах. Здесь следует отметить работы Чернова Д.К., Надаи А., Кузнецова В.Д., Губкина С.И., Пашкова П.О., Давиденкова Н.Н., Преснякова А.А. и др.

Неоднородность пластической деформации монокристаллов исследована в значительно меньшей степени. Между тем, использование материалов с комплексом анизотропных свойств возможно только при выявлении закономерностей протекания пластической деформации на монокристаллах. При изучении закономерностей неоднородности пластической деформации монокристаллических металлических материалов необходимо учесть влияние кристаллографической ориентации не только оси деформации, но и боковых граней исследуемого объекта, так как они также оказывают влияние на организацию деформации. Кроме этого необходимо принимать во внимание характер пространственного распределения напряжений в образце.

При исследовании важным является определение в разных областях материала **структурных элементов деформационного рельефа** (следов скольжения и сдвига, мезо- и макрополос деформации, складок, деформационных доменов), которые отражают локальные особенности протекания пластической деформации.

В настоящее время общим методологическим подходом постановки исследования является рассмотрение пластической деформации на разных масштабных уровнях. Данное направление активно развивается в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, где основными методами исследования неоднородности пластического течения являются спекл-интерферометрия и метод корреляции цифровых изображений.

При постановке исследования неоднородности пластической деформации монокристаллов очень важна информация по систематизации деформационного рельефа на разных масштабных уровнях. Такая работа была проделана в Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) на ГЦК-монокристаллах Ni, Al, Cu и сплавах Cu-12%Al, Ni<sub>3</sub>Fe и Ni<sub>3</sub>Ge Конева Н.А., Козловым Э.В., Старенченко В.А., Тепляковой Л.А., Абзаевым Ю.А., Лычагиным Д.В. и их коллегами. Это позволило перейти к новому этапу научных исследований: количественному определению локальной деформации в областях с различным характером деформационного рельефа.

**Цель диссертационной работы:** установить влияние кристаллографической ориентировки монокристаллов никеля и геометрической формы образцов на формирование деформационного рельефа и неоднородность пластической деформации с учетом характера распределения напряжений в образце при сжатии.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Методом конечных элементов в упругой области для изотропного материала с учетом силы торцевого трения определить пространственное распределение напряжений в образце при сжатии.

2. Исследовать влияние кристаллографической ориентации монокристаллов никеля на формирование деформационного рельефа и неоднородность пластической деформации.

3. Изучить влияние схемы главных напряжений и базовых концентраторов напряжений на неоднородность пластической деформации при сжатии.

4. Установить факторы неоднородного развития пластической деформации в монокристаллах никеля при сжатии.

5. Выявить связь характера распределения напряжений и формирования деформационного рельефа с неоднородностью пластической деформации. Установить места локализации деформации.

**Научная новизна:** 1. В работе впервые количественно определена неоднородность пластической деформации монокристаллов никеля различной кристаллографической ориентации на разных масштабных уровнях с учетом формирования деформационного рельефа и распределения напряжений в образце при сжатии. 2. По результатам работы была проведена систематизация структурных элементов деформационного рельефа в зависимости от кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней. Определены доли структурных элементов деформационного рельефа, что позволило выявить роль областей, занятых этими элементами на макро- и мезоуровне, в пластической деформации исследованных монокристаллов. Установлено, что внутри деформационных доменов области локализации не возникают. Развитие структур внутри них происходит таким образом, чтобы снизить неоднородность деформации и приблизить среднее значение деформации к деформации в данном локальном месте. 3. Местами локализации деформации являются области стыка соседних деформационных доменов, в которых действуют разные системы сдвига, и приторцевые области, где повышенная деформация связана с переносом материала вследствие торцевого трения. Показана роль характера распределения напряжений в неоднородности пластической деформации.

**Научная и практическая значимость работы:** экспериментальные результаты, полученные в работе на монокристаллах никеля, обладают достаточной общностью, что позволяет использовать их при исследовании закономерностей пластической деформации других ГЦК-монокристаллов. Результаты работы дают возможность предложить методологическую основу для выбора кристаллографической ориентации монокристаллов, обеспечивающей более однородное протекание пластической деформации. Работа имеет фундаментальный характер и может быть полезна коллективам занимающимся вопросами физики пластичности и прочности металлических материалов.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта №02.740.11.0823 (2009-2013).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

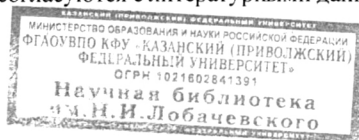
1. Фрагментация ГЦК-монокристаллов с симметричной ориентацией оси нагружения есть способ реализации низкосимметричной деформации по системам параллельных плоскостей скольжения или путем организации деформации по системам мезо- и макрополос деформации с сохранением высокосимметричной деформации монокристалла в целом.

2. Совокупность экспериментальных данных, показывающих влияние кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней на образование деформационного рельефа и неоднородность пластической деформации.

3. Места локализации деформации и величина деформации определяют схемой главных напряжений, базовыми концентраторами напряжений и областями формирования структурных элементов деформационного рельефа при сжатии.

4. Организация внутридоменной деформации происходит таким образом, чтобы понизить неоднородность ее протекания. С увеличением размеров структурных элементов повышается неоднородность деформации в местах стыка деформационных доменов, образованных этими структурными элементами.

**Достоверность** обеспечивается корректностью постановки задачи, ее решением с использованием современных методик, устойчивой воспроизводимостью полученных результатов, которые согласуются с литературными данными.





**Личный вклад автора** состоит в совместной с научным руководителем постановке цели и задач исследования, организации и проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, написании научных статей и текста диссертационной работы.

**Апробация работы:** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Российской школе-конференции молодых ученых и преподавателей «Биосовместимые наноструктурные материалы и покрытия медицинского назначения» (Белгород, 2006); 45-й международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Белгород, 2006); XIII, XIV, XV, XVI Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технология» (Томск, 2007, 2008, 2009, 2010); V, VI, VII Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2007, 2008, 2009); I, II Международных научно-практических конференциях с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2010, 2011); Международных научных школах-конференциях «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2007, 2009, 2011); IX, X, XI Международных научных школах-семинарах «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, 2006, 2008, 2010); XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара, 2009); V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010); Всероссийской молодежной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (Юрга, 2011); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному моделированию и разработке новых материалов (Томск, 2011).

**Публикации:** по материалам диссертационной работы опубликовано 33 работы, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 5 – в рецензируемых научных журналах, 26 – в сборниках трудов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 27 рисунков, 13 таблиц, 4 приложения. Библиографический список включает 138 источников. Общий объем работы – 176 страниц. Приложение – 124 страницы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, приводится краткое содержание диссертационной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

### **1. Неоднородность пластической деформации.**

В разделе рассмотрено современное состояние вопроса, изложены основные подходы к изучению неоднородности пластической деформации. Из анализа литературных данных сделан вывод о том, что, несмотря на большой объем работ по изучению картины деформационного рельефа и неоднородности пластической деформации на качественном уровне, практически нет работ, в которых давалась бы количественная оценка величины деформации, её неоднородности и локализации во взаимосвязи со структурными элементами деформационного рельефа и распределением напряжений.

### **2. Материал и методики исследования.**

В разделе дано обоснование выбора материала. Описаны методики приготовления и деформации монокристаллов. Приведены методы получения количественных данных по неоднородности деформации.

В качестве объекта исследования были выбраны монокристаллы никеля (примеси менее 0,01%), выращенные по методу Бриджмена. Исследовали образцы с ориентациями в углах стереографического треугольника, а также с осями сжатия

[112] и  $[\bar{3}033.33]$  с различными наборами боковых граней. Деформацию сжатием осуществляли на машине «Инстрон» со скоростью  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  при  $20^\circ \text{C}$ .

Оценку пространственного распределения напряжений в упругой области проводили методом конечных элементов с использованием программы ANSYS в Томском государственном университете (ТГУ). Расчет выполняли для изотропного материала с учетом силы торцевого трения. Для определения величины локальной деформации были использованы: метод делительных сеток и метод корреляции цифровых изображений (КЦИ). Абсолютная погрешность измерения вектора смещения методом КЦИ при оптическом увеличении  $\times 200$  составляла  $\pm 0,5 \text{ мкм}$ . Точность определения деформации методом сеток находилась на уровне  $\pm 0,01$  (в относительных единицах). По полученным значениям строили пространственные распределения (карты) для каждой из главных компонент деформации  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  и интенсивности деформации  $\Gamma$ . При использовании метода корреляции цифровых изображений на основе оптических изображений поверхности монокристалла рассчитывали поля векторов необратимых смещений и соответствующие массивы продольных  $u_z(z,y)$  и поперечных  $u_y(z,y)$  смещений, представляющих собой проекции для каждого вектора. Направление продольных смещений совпадало с направлением действующей силы. Величины компонент тензора деформации рассчитывали по известным формулам механики деформируемого твердого тела. Расчет проводили с помощью компьютерных программ, разработанных в ИФПМ СО РАН. Картины деформационного рельефа в масштабе образца снимали с помощью оптических микроскопов МИМ-8 и Leica DM 2500P и растровых электронных микроскопов Tesla BS-301 и Tescan Vega II LMU в ТГАСУ и ТГУ.

### 3. Влияние перераспределения напряжений на неоднородность деформации монокристаллов никеля.

В разделе рассматриваются факторы, влияющие на фрагментацию и картину деформации монокристаллов (различие схемы главных напряжений в соседних макрообъемах монокристалла и базовые концентраторы напряжений), являющиеся частным случаем неоднородного распределения напряжений в образце. При механических испытаниях на сжатие образец подвергается воздействию одноосного механического нагружения. Поле напряжений в этом случае графически может быть представлено в виде цилиндра, симметрия которого соответствует предельной группе  $\frac{\infty}{m}$  в семействе групп  $\frac{N}{m} - D_{nh}$ . Наложение этого поля на образец, который имеет форму прямоугольного параллелепипеда (группа  $\frac{4}{m} - mmm$  того же семейства групп), приводит к неоднородному распределению напряжений в нём, начиная с упругой области деформаций. Расчеты, проведенные методом конечных элементов, показали, что при приложении внешней нагрузки к образцу в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратным поперечным сечением происходит перераспределение напряжений, приводящее к понижению симметрии исходного поля с группы  $\frac{\infty}{m}$  до группы  $\frac{4}{m} - mmm$  для интенсивности напряжений и до  $mmm$  для нормальных напряжений. Дополнительным условием, требующим понижения симметрии в локальных объемах монокристалла, является условие сдвига одновременно по одной или двум системам скольжения в пачке (макропачке) плоскостей октаэдрического сдвига. Это приводит к тому, что кристалл, стремясь наиболее рационально реализовать изменение формы при сохранении симметрии распределения поля напряжений в образце, разбивается на домены сдвига, симметрия которых уже не соответствует симметрии объемной фигуры (образца), а должна понижаться до симметрии плоскости (плоскости скольжения).

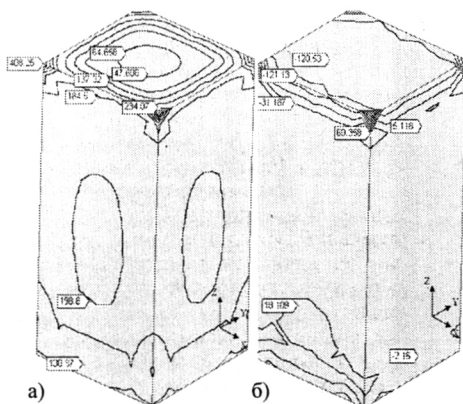


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений (а) и нормальных напряжений (б) на торцевой и боковых поверхностях образцов никеля с учетом силы трения о пуансоны, МПа

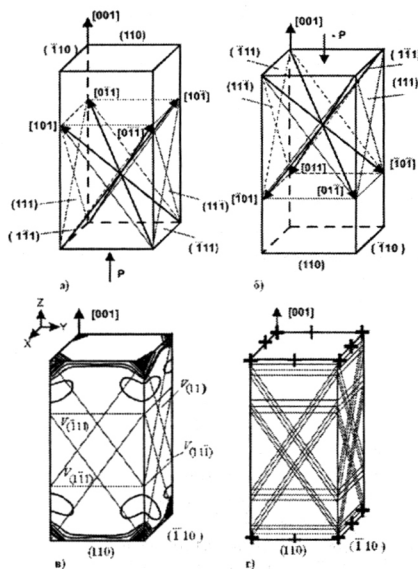


Рис. 2. Кристаллографическая схема расположения плоскостей и направлений сдвига, активных при соответствующем приложении внешней нагрузки (а-б), схемы наложения внешнего поля на образец (в) и расположения базовых концентраторов напряжений относительно выходов плоскостей сдвига (г)

Монокристалл представляет собой полидоменное образование, симметрия которого в целом может соответствовать более высокой группе симметрии (псевдосимметрии) образца или кристалла с более низкой симметрией отдельного домена.

В диссертационной работе показано, что в рассматриваемом типе образцов наблюдается значительное отклонение локальных напряжений от средних значений. Максимальная величина интенсивности напряжений и нормальных напряжений наблюдается у вершин параллелепипеда (рис. 1, а, б). Вблизи вершин образцов на вертикальных ребрах возникают области растягивающих напряжений (рис. 1, б), усиливая картину неоднородности этих напряжений и определяя места со сложной схемой напряженного состояния. Создается область повышенной интенсивности напряжений в центрах боковых граней (рис. 1, а). Таким образом, внешнее напряжение распределяется так, что его наибольшая величина наблюдается у вершин образца и приторцевых ребер. Установлено, что в этих областях величина напряжений превышает среднюю по образцу и в этом смысле их можно рассматривать как базовые концентраторы напряжений (в особенности, вершины образца). При анализе результатов расчетов нормальных напряжений, полученных методом конечных элементов (рис. 1, б), были обнаружены локальные области растяжения. Причем, такие области растяжения наблюдаются при сжатии уже с малых (до  $\epsilon = 0,05$ ) степеней деформации. Следовательно, схема распределения главных напряжений при сжатии и наличии торцевого трения сложнее, чем это дается в схеме Губкина С.И.

В разделе рассматривается влияние ориентации оси деформации и схемы главных напряжений на неоднородность деформации монокристаллов с ориентациями осей сжатия:  $[001]$  с боковыми гранями  $\{110\}$ ,  $[110]$  с боковыми гранями  $\{001\}$ ,  $(\bar{1}10)$ ,  $[\bar{1}11]$  с боковыми гранями  $(110)$ ,  $(1\bar{1}2)$ ,  $[33.33.30]$  (отклонение на  $2^\circ$  от направления  $[\bar{1}11]$ ) с боковыми гранями  $(110)$ ,  $(10\bar{1}0.22)$  и  $[\bar{1}12]$  с боковыми гранями  $(111)$ ,  $(110)$ . Для каждого случая проведен анализ кристаллографии, построены карты распределения главных компонент и интенсивности деформации, рассчитаны статистические характеристики распределения пластической деформации по грани целиком, по отдельным деформационным доменам и с учетом схемы напряженного состояния. Полученные данные представлены в приложении к диссертации.

Для случая  $[001]$ -монокристаллов с боковыми гранями  $\{110\}$  плоскости сдвига проходят через приторцевые ребра образца (рис. 2, *a-b*) и при наложении внешнего поля на образец базовый концентратор напряжений является линейным (рис. 2, *в-г*). Проанализировано распределение интенсивности  $\Gamma$  и главных компонент  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  деформации по грани (рис. 3, *в, г-е*). Анализ карт показывает, что для случая  $\{110\}$  боковых граней деформация распределена достаточно однородно по всем компонентам деформации. Местами локализации деформации являются приторцевые ребра образца (базовые концентраторы напряжений).

При анализе неоднородности деформации для доменов, попадающих в разную схему напряженного состояния, выявлено, что наиболее высокое значение неоднородности деформации по всем компонентам характерно для доменов, работающих в условиях всестороннего сжатия, а максимально однородно деформация протекает в доменах, попадающих в схему одноосного нагружения. Неоднородность деформации в приторцевых доменах примерно в 1,3 раза выше, чем в центральных. Следовательно, для доменов, образованных системами следов сдвига, существенное влияние на неоднородность деформации оказывают базовые концентраторы напряжений, места стыка деформационных доменов, схема напряженного состояния и приторцевый эффект.

Исследования, проведенные на монокристаллах всех указанных выше кристаллографических ориентаций, позволили установить, что наиболее высокие значения локальной деформации на макроуровне характерны для областей стыка соседних деформационных доменов, в которых действуют разные системы скольжения и для приторцевых областей. Экспериментально выявлено, что на макроуровне неоднородность деформации зависит от масштаба структурного элемента деформационного рельефа. Максимальная неоднородность деформации на макроуровне отмечена для монокристаллов с осью сжатия  $[\bar{1}11]$ , где характерными структурными элементами деформационного рельефа являются макрополосы

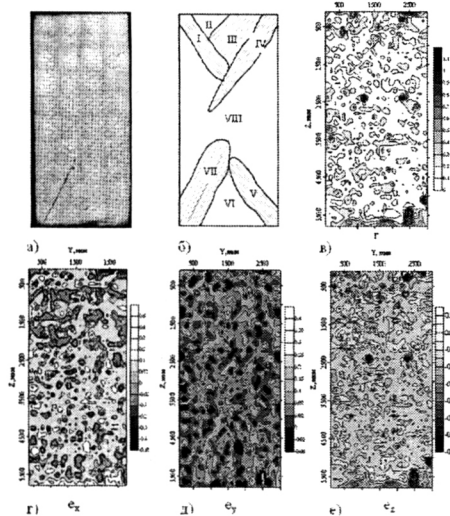


Рис. 3. Картина деформационного рельефа на боковой грани  $(110)$  монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия  $[001]$  после деформации на  $\epsilon = 0,06$  (*a*), схема разбиения монокристалла на деформационные домены (*б*), карта распределения интенсивности деформации по грани (*в*), карты распределения компонент деформации, (*г-е*)

и складки. Наиболее однородно деформация протекает у монокристаллов с осью сжатия  $[001]$  (структурный элемент деформационного рельефа – следы сдвига). Для монокристаллов с ориентацией оси сжатия  $[1\bar{1}2]$ , несмотря на то, что при деформации  $\epsilon=0,06$  основным структурным элементом деформационного рельефа являются следы сдвига (как в случае оси сжатия  $[001]$ ), эта ориентация является следующей по величине неоднородности деформации после  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов. Данный факт связан с более низкой симметрией ориентации и в максимальной степени определяется кристаллографическим фактором. Можно полагать, что полученные закономерности могут быть общими и для других ГЦК-монокристаллов данных ориентаций, т.к. там наблюдаются подобные структурные элементы деформационного рельефа и организация деформации близка организации деформации в никеле.

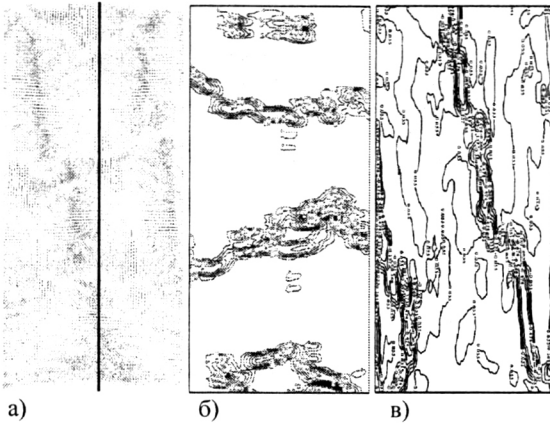


Рис. 4. Поле векторов смещений,  $\epsilon=0,05$ ,  $\Delta\epsilon=0,05$  (а), пространственное распределение продольной  $\epsilon_{zz}(z,y)$  (б) и поперечной  $\epsilon_{yy}(z,y)$  (в) компонент тензора

ет отметить, что на вертикальных границах первичных доменов преобладает действие компоненты  $\epsilon_{yy}$ , а на горизонтальных –  $\epsilon_{zz}$  (см. рис. 4, а-б). Резкое увеличение значения деформации на границах доменов связано с различием в величинах компонент тензора деформации в соседних доменах.

#### 4. Влияние кристаллографической ориентации боковых граней на неоднородность деформации.

В разделе приведены данные исследований неоднородности деформации монокристаллов никеля следующих ориентаций оси сжатия и боковых граней:  $[001]\{100\}$ ;  $[110](1\bar{1}2)$ ,  $(1\bar{1}\bar{1})$ ;  $[\bar{1}11]\{110\}$  и  $\{112\}$ .  $[\bar{1}11]$ -монокристаллы имели форму прямоугольного параллелепипеда и треугольной правильной прямой призмы. Полученные результаты в сравнении с результатами, представленными в разделе 3, позволили установить влияние кристаллографической ориентации боковых граней на неоднородность деформации.

Сравнивая монокристаллы с одинаковой осью деформации  $[001]$ , но с разными боковыми гранями, можно сделать вывод, что для боковых граней  $\{100\}$  неоднородность деформации, оцененная по всей грани, выше, чем для монокристаллов с боковыми гранями  $\{110\}$ , приблизительно в 1,4 раза. Различие распределения деформации зависит от кристаллографической ориентации, что связано с органи-

На примере  $[110]$ -монокристаллов проведено исследование пластической деформации методом корреляции цифровых изображений. На картине полей векторов смещений монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия  $[110]$  на боковой грани  $(110)$  (рис. 4, а) хорошо видны первичные деформационные домены, по границам которых при  $\epsilon = 0,05$  формируются вторичные домены деформации. На участках наибольшей деформации по компоненте  $\epsilon_{zz}$  наблюдаются области не только сжатия (знак «-»), но и растяжения (знак «+») (рис. 4, б). Следу-

зацией сдвига в макромасштабе образца, обусловленного осуществлением деформации по системам сдвига согласно обобщенному закону Шмида (в области, где две или три главные компоненты тензора напряжений отличны от нуля). Можно полагать, что наиболее оптимальным для формоизменения материала является равнозначность относительного выхода на боковые грани плотноупакованных направлений, что реализуется в  $\{001\}$ -монокристаллах с боковыми гранями  $\{110\}$ . При сравнении неоднородности деформации монокристаллов с осью сжатия  $[110]$  с разным набором боковых граней выявлено, что неоднородность деформации выше в 1,9...2,5 раза на грани  $(\bar{1}10)$  по сравнению с гранью  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  и в 1,25...1,4 раза на грани  $(1\bar{1}2)$  по сравнению с гранью  $(001)$ . Разница в значениях неоднородности деформации связана с ориентацией плотноупакованных плоскостей и направлений сдвига относительно боковых граней. При этом наиболее высокое значение неоднородности деформации характерно для грани  $(\bar{1}10)$ , что, по всей видимости, связано с наибольшим числом деформационных доменов. Увеличению количества доменов способствует расположение плоскостей сдвига относительно базовых концентраторов напряжения (вершин и приторцевых ребер образца), которое приводит к активизации наибольшего числа систем сдвига.

Исследование деформационного рельефа на боковых гранях  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов позволило выявить и систематизировать основные структурные элементы деформационного рельефа. Их классификация для разных кристаллографических ориентаций оси сжатия, боковых граней и формы образца с характерным интервалом размеров отдельных структурных элементов рельефа и их систем представлена в таблице. Выделенные элементы деформационного рельефа образуют индивидуальную картину макрорельефа на каждой грани. При этом на локальных участках грани могут наблюдаться как один из элементов рельефа, так и их комбинации.

Проведенные исследования на  $[\bar{1}11]$ - и  $[\bar{3}3.33.30]$ -монокристаллах показали, что формирование макрополос деформации характерно для всех рассмотренных в работе случаев кристаллографических ориентаций. В тоже время формирование деформационных складок наблюдается не во всех случаях. Вид складок зависит, кроме прочего, и от места их формирования, т.е. схемы напряженного состояния (табл.).

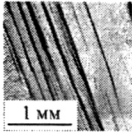
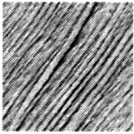
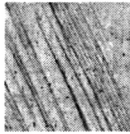
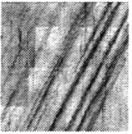




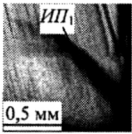
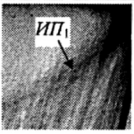
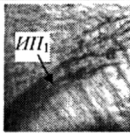
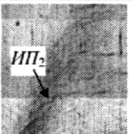
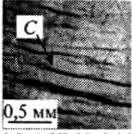
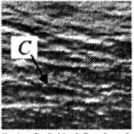
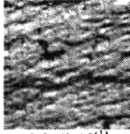
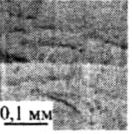
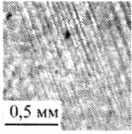
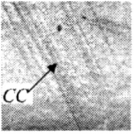
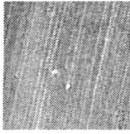
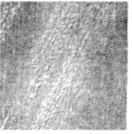
В  $[\bar{1}11]$ -монокристаллах в форме прямоугольного параллелепипеда деформация осуществляется путем образования нескольких систем макрополос и последующего складкообразования, что наиболее сильно проявляется на гранях  $(1\bar{1}2)$ . В образцах с осью сжатия  $[\bar{3}3.33.30]$  формируется одна система макрополос сдвига, что приводит к потере устойчивости образца. В этих образцах более интенсивно, чем в образцах с точной ориентацией оси сжатия, идет складкообразование. Формирование одной системы макрополос, вероятно, связано с тем, что при отклонении оси от точной ориентации из шести систем сдвига более выигрышной становится одна. Сравнение развития макрополос в этих образцах позволяет считать, что наличие шести равнонагруженных систем сдвига не является обязательным условием для образования макрополос деформации. В  $[\bar{1}11]$ -монокристаллах в форме треугольной правильной прямой призмы с разным набором боковых граней  $\{112\}$  и  $\{110\}$  при  $\epsilon=0,05$  деформация реализуется преимущественно путем образования макрополос, что может быть достаточно для обеспечения деформации образца без привлечения складкообразования.

Различие в характере фрагментации и развитии структурных элементов деформационного рельефа на макроуровне нашло свое отражение в распределении локальной деформации на гранях  $[\bar{1}11]$ - и  $[\bar{3}3.33.30]$ -монокристаллов с разной формой образца.

Места локализации деформации на макроуровне для  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов связаны с фрагментацией монокристалла системами макрополос и складок. Наиболее высокая деформация наблюдается в местах стыка систем макрополос и обусловлена несовместностью деформации в этих системах.

Таблица

Структурные элементы деформационного рельефа  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов никеля и их геометрические характеристики (длина/ширина, мм)

Ось деформации	$[\bar{1}11]$	$[\bar{3}3.33.30]$	$[\bar{1}11]$	
Форма образца	Параллелепипед		Треугольная правильная прямая призма	
Боковые грани	$(110), (1\bar{1}2)$ или $(10.\bar{1}0.22)$		$\{110\}$	$\{112\}$
Структурные элементы деформационного рельефа				
Система макрополос деформации				
Макрополосы деформации (МПД) и их внутренняя структура	 1,0÷6,0/0,3÷1,2 0,2 мм	 1,0÷6,0/3 0,2 мм	 1,0÷6,0/0,5÷0,7 0,2 мм	 1,0÷6,0/0,5÷0,7 0,2 мм
Изгибные макрополосы (ИП <sub>1</sub> , ИП <sub>2</sub> ) (складки у торцов образца) и их размеры	 1,1÷3,0/0,06÷0,30 0,5 мм	 1,1÷3,0/0,06÷0,30 0,5 мм	 0,3÷1,2/0,06÷0,30 0,5 мм	 0,9÷1,7/0,1÷0,10 0,5 мм
Складки (C) и их размеры: (1) образец А (2) образец В	центральная часть образца			приторцевая область
	 0,3÷1,5/0,08÷0,16 0,5 мм	 0,1÷2,0/0,02÷0,10 0,5 мм	 0,24/0,13 <sup>(1)</sup> 0,06÷0,8/0,06÷0,1 <sup>(2)</sup> 0,5 мм	 0,1÷0,2/0,05÷0,11 0,1 мм
Следы сдвига (CC) и их размеры	 0,5 мм	 0,5 мм	 0,5 мм	 0,5 мм
0,03÷1,50/5·10 <sup>-5</sup> ÷15·10 <sup>-5</sup>				

В образцах с осью сжатия  $[\bar{3}3.33.30]$  формируется одна система макрополос и не образуется областей высоких локальных деформаций.

Следовательно, при одинаковой схеме напряженного состояния в зависимости от организации деформации может достигаться разная локальная степень деформации.

Более однородной деформации монокристаллов способствует совпадение симметрии образца с кристаллографической симметрией оси сжатия. Такой случай был реализован при использовании образцов в форме треугольной правильной прямой призмы. Результаты исследований, представленные в данном разделе, позволяют связать кристаллографическую ориентацию боковых граней, а также геометрическую форму монокристаллов никеля со степенью реализации деформации определенными структурными элементами деформационного рельефа на разных масштабных уровнях.

Таким образом, рассмотрение организации деформации в объеме монокристалла позволяет установить места наибольшей локализации деформации и выявить кристаллографическую ориентацию монокристаллов, обладающую наименьшей неоднородностью деформации.

### 5. Неоднородность деформации в системах структурных элементов.

В разделе рассматривается неоднородность деформации внутри доменов, образованных следами сдвига, мезо- и макрополосами для монокристаллов с разной кристаллографической ориентацией оси сжатия и боковых граней. Анализ полученных данных для монокристаллов с осью сжатия  $[001]$  показывает, что значения неоднородности деформации внутридоменной области, образованной системами следов сдвига, несколько выше для случая боковых граней  $\{110\}$  по сравнению с гранями  $\{100\}$  (по компоненте  $e_y$  – 1,6 раза; по компоненте  $e_z$  – 1,3 раза; по компоненте  $e_x$  на гранях  $\{110\}$  и  $\{100\}$ ). Более высокие значения неоднородности деформации характерны для доменов, попадающих или на границу разных схем главных напряжений, или в приторцевые области (схема всестороннего сжатия). В случае реализации схемы одноосного сжатия в центральной области монокристаллов значения среднего квадратического отклонения для монокристаллов с разными боковыми гранями близки. Измерения локальной деформации подтвердили установленный ранее факт, что макрополосы в  $[001]$ -монокристаллах с боковыми гранями  $\{110\}$  имеют аккомодационный характер.

Для  $[1\bar{1}2]$ -монокристаллов в опытах с переполнкой при  $e = 0,06+0,05$  выявлено, что неоднородность деформации внутри доменов возрастает за счет развития вторичной фрагментации первичных доменов.

Анализ средней деформации каждого домена  $[110]$ -монокристаллов, а также компонент главных деформаций свидетельствует о преобладании в них приторцевых областей деформации скоплением по пачке плоскостей сдвига вдоль плотноупакованных направлений. В доменах, выходящих на центральную часть грани, реализуется деформация, связанная с развитием мезополос, включение которых в деформацию приводит к более высокому значению неоднородности пластического течения внутри домена. В работе отдельно были рассмотрены домены, работающие в центральной части грани. Это позволило связать неоднородность деформации только со структурными элементами деформационного рельефа – мезополосами, без учета влияния различия в схеме главных напряжений. Полученные результаты показали, что неоднородность деформации по всем компонентам выше для доменов, в которых мезополосы наиболее развиты, т.е. степень неоднородности внутри домена связана со степенью развития структурного элемента деформационного рельефа.

На рис. 5 приведена зависимость продольных смещений, построенная с использованием метода корреляции цифровых изображений. Из графика видно, что резкое увеличение деформации наблюдается на границе доменов.



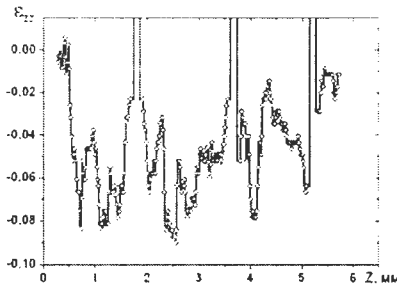


Рис. 5. Продольная деформация  $\varepsilon_{zz}$  вдоль секущей на рис. 4, а;  $e = 0.05$ ,  $\Delta e = 0.05$

В то время как в пределах отдельных доменов действует деформация сжатия по компоненте  $\varepsilon_{zz}$ , на границах этих доменов имеет место деформация растяжения высокой амплитуды. Таким образом, приведенные данные подтверждают результаты, полученные методом делительных сеток. Продольная деформация протекает внутри доменов неоднородно, еще большая неоднородность отмечается на границах деформационных доменов. Видно, что в пределах каждого домена происходит формирование новых доменов, т.е. наблюдается вторичная фрагментация.

При рассмотрении внутридоменной неоднородности деформации  $[\bar{1}11]$ -монокристаллов (домены сформированы макрополосами и складками) выявлено, что величина неоднородности достигает максимальных значений у доменов, попадающих в схему всестороннего сжатия и на границу областей с разной схемой главных напряжений. Для доменов, сформированных макрополосами, отмечено невысокое значение неоднородности деформации. Это, вероятно, связано с тем, что внутри макрополос реализуется механизм, способный скомпенсировать неоднородность деформации внутри домена и обеспечить целостность образца при деформации. Исследования на монокристаллах с осью сжатия  $[\bar{3}3.33.30]$  и монокристаллов в форме правильной треугольной призмы количественно подтвердили связь неоднородности деформации внутри домена и кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней. Неоднородность внутри доменов, сформированных в  $[\bar{3}3.33.30]$ -монокристаллах, в 1,3...2,2 раза (в зависимости от компоненты) ниже, чем для доменов при точной ориентации оси сжатия  $[\bar{1}11]$ . Такое снижение внутридоменной неоднородности деформации, очевидно, связано с тем, что монопольное формирование макрополос вдоль одного направления не требует компенсации несовместности деформации между доменами, образованными разными системами макрополос.

В работе для всех исследованных кристаллографических ориентаций оси сжатия и боковых граней было изучено распределение деформации в системах отдельных структурных элементов деформационного рельефа. На рис. 6, б показано распределение главных компонент деформации вдоль отдельных мезополос (нумерация рассматриваемых структурных элементов указана на рис. 6, а). Аналогичные данные получены для всех структурных элементов и представлены в приложении к диссертации. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что осцилляция деформации характерна для всех рассмотренных случаев структурных элементов деформационного рельефа независимо от их масштаба.

На рис. 6, в показано распределение деформации вдоль параллельных мезополос деформации и распределение средней деформации в системе мезополос, также приведено среднее значение деформации внутри деформационного домена и среднее значение по грани целиком (пунктирная и штрихпунктирная линии). Аналогичные данные были получены в диссертационном исследовании для следов сдви-

га и макрополос. Измерения проводили вдоль структурных элементов 8 – 12. Сравнение и суммирование деформации осуществляли перпендикулярно структурным элементам вдоль линии (см. рис. 6, а).

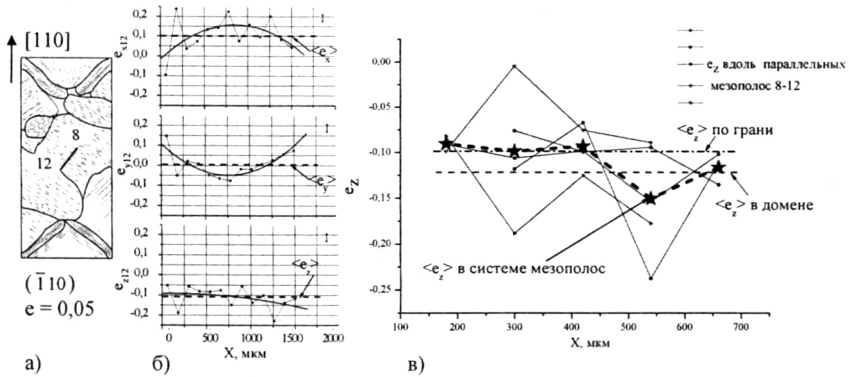


Рис. 6. Распределение компонент деформации вдоль мезополос

Качественное рассмотрение поведения локальной деформации при одном значении координаты  $X$  вдоль структурных элементов деформационного рельефа свидетельствует о том, что осцилляция происходит таким образом, чтобы компенсировать деформацию в параллельных структурных элементах. Количественно деформацию можно определить, рассмотрев суммарную деформацию в параллельных соседних структурных элементах. В диссертационной работе было проведено суммирование соответствующих компонент деформации при одном значении координаты  $X$ , далее результат был приведен к значениям деформации одного структурного элемента. Полученные данные приближаются к среднему, и уменьшается амплитуда осцилляции этих значений (рис. 6, в). Для одного структурного элемента значения размаха вариации компоненты  $e_z$  изменяются в следующих пределах: для следа сдвига от  $-0,31$  до  $+0,03$ , для мезополосы – от  $-0,23$  до  $-0,06$  и для макрополосы – от  $-0,17$  до  $+0,06$ . Размах вариации суммарного значения, рассчитанный для близлежащих точек соседних параллельных структурных элементов, сужается: для следа сдвига от  $-0,11$  до  $0$ , для мезополосы – от  $-0,15$  до  $-0,09$  и для макрополосы – от  $-0,25$  до  $-0,05$ . Данный факт свидетельствует о том, что подстройка параллельных структурных элементов деформационного рельефа происходит таким образом, чтобы максимально скомпенсировать внутренние напряжения и уменьшить неоднородность деформации в области, занятой рассматриваемым типом структурных элементов рельефа.

Для оценки неоднородности деформации было использовано среднее квадратическое отклонение ( $Sd$ ), рассматривали значения для отдельных структурных элементов и для параллельно расположенных структурных элементов деформационного рельефа. В последнем случае использовали приведенное значение  $Sd$ . Анализ полученных данных показал, что неоднородность деформации в группе параллельных структурных элементов ниже по сравнению с неоднородностью деформации в отдельном структурном элементе, т.е. неоднородность деформации не накапливается, а компенсируется. В близлежащих точках соседних параллельных

структурных элементов (при одной координате  $X$ ) неоднородность деформации уменьшается. Следовательно, организация деформации в параллельных структурных элементах деформационного рельефа, образующих домен, происходит таким образом, чтобы снизить неоднородность деформации внутри домена, а деформацию в данном локальном месте приблизить к средней деформации. Этот факт также подтверждают данные о том, что неоднородность деформации внутри деформационного домена ниже, чем на всей грани (данные приведены в приложении к диссертации).

Таким образом, в работе было установлено влияние кристаллографической ориентацией оси сжатия, боковых граней и формы образца на неоднородность деформации, была выявлена связь структурных элементов деформационного рельефа с величиной неоднородности деформации, а также определена роль характера напряжений в распределении неоднородности пластической деформации по граням монокристаллов никеля на разных масштабных уровнях при сжатии.

### Основные выводы

На основании полученных данных и их анализа сделаны следующие выводы:

1. В результате сопоставления симметрии поля напряжений в образце, кристаллографической ориентации оси сжатия монокристалла и развития деформации в образце выявлено, что фрагментация при пластической деформации определяет возможность протекания низкосимметричной сдвиговой деформации при сохранении более высокой псевдосимметрии монокристалла. При этом различие в величине локальной деформации в соседних областях монокристалла зависит от размера и степени несовпадения симметрии картины распределения напряжений, формы образца и кристаллографической симметрии систем структурных элементов деформационного рельефа.

2. Непосредственным измерением локальной деформации монокристаллов методом сетки и методом корреляции цифровых изображений впервые получены численные значения локальной деформации для областей с разной схемой главных напряжений. Наиболее высокие значения локальной деформации характерны для: 1) областей стыка соседних деформационных доменов, в которых действуют разные системы; 2) приторцевых областей, где повышенная деформация связана с переносом материала вследствие торцевого трения.

3. Впервые на примере  $[110]$ -монокристалла никеля на боковой грани  $(110)$  методом корреляции цифровых изображений получена картина деформации отдельного домена и фрагментации монокристалла. Выявлено, что на горизонтальных границах доменов преобладает компонента  $\varepsilon_{xx}$ , а на вертикальных –  $\varepsilon_{yy}$ . На границах деформационных доменов наблюдается максимальное значение главного пластического сдвига.

4. Определена роль схемы главных напряжений и необходимость использования обобщенного фактора Шмида при анализе картины деформационного рельефа и локальной деформации. Показана общность полученных результатов в сопоставлении с данными, полученными на монокристаллах алюминия.

5. Впервые получены численные значения локальной деформации для областей с различными структурными элементами деформационного рельефа. Установлено, что для деформационных доменов, образованных следами сдвига (ось сжатия  $[001]$ ), существенное влияние на неоднородность деформации оказывают: базовые концентраторы напряжений, места стыка деформационных доменов и приторцевой эффект. Приторцевой эффект в меньшей степени сказывается на доменах, образованных системами мезополос (ось сжатия  $[110]$ ). Здесь наибольшее

влияние на неоднородность деформации оказывают базовые концентраторы напряжений. В обоих случаях несомненно влияние схемы главных напряжений. Для доменов, образованных макрополосами и макроскладками (ось сжатия  $[111]$ ), существенна схема напряжений и несовместность деформации в соседних доменах.

6. При изменении кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней изменяется расположение систем сдвига относительно базовых концентраторов напряжений и областей с разной схемой главных напряжений. Расположение систем сдвига относительно базовых концентраторов напряжений влияет на количество активных систем сдвига, а, следовательно, и на распределение деформации в образце.

7. Установлена организация деформации в следах сдвига, мезо- и макрополосах. Для всех рассмотренных в работе вариантов кристаллографической ориентации оси сжатия и боковых граней наблюдается осциллирующий характер изменения компонент деформации. Выявлено, что накопление деформации вдоль систем структурных элементов и в параллельных структурных элементах развивается таким образом, чтобы уменьшить неоднородность деформации.

8. В результате анализа неоднородности деформации в доменной структуре, образованной разными структурными элементами деформационного рельефа, было установлено, что с увеличением их масштаба неоднородность деформации в местах стыка доменов возрастает.

**Результаты диссертационной работы опубликованы в 33 работах, из них 2 статьи – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 5 – в рецензируемых научных журналах, 26 – в сборниках трудов конференций.**

**В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А. Причины развития неоднородной пластической деформации ГЦК-монокристаллов, деформированных сжатием // Деформация и разрушение материалов – 2010. – №10 – С. 1-10.

2. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A., Starenchenko V.A. Effect of crystallographic states on the development of macrobands and deformation inhomogeneity in  $[111]$  nickel single crystals // Physical Mesomechanics – 2011. – Т. 14. – №1-2 – С. 66-78.

**В других рецензируемых научных журналах\*:**

1. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А. Фрагментация и симметрия ГЦК-монокристаллов при сжатии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2006. – Т.3. – №2. – С. 9 – 12.

2. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А., Шаехов Р.В., Лычагин А.Д., Старенченко В.А. Неоднородность деформации в монокристаллах никеля с разной иерархией структурных элементов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2007. – Т.4. – №2. – С. 26 – 35.

3. Лычагин Д.В., Шаехов Р.В., Алфёрова Е.А. Влияние кристаллогеометрической установки на неоднородность сдвиговой деформации ГЦК-монокристаллов при сжатии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2008. – Т.5. – №2. – С. 101 – 108.

4. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А., Голосова Т.Н., Лычагин А.Д. Неоднородность и локализация деформации в монокристаллах никеля с осью сжатия  $[001]$  // Обработка металлов. – 2009. – №3(44). – Изд. НГТУ. – 40 с. – С. 37-38.

5. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А., Голосова Т.Н., Лычагин А.Д., Старенченко В.А. Роль октаэдрического скольжения в организации деформации ГЦК-монокристаллов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения – 2010. – Т.7. – №1. – С.106-111.

\* Журналы входят в список ВАК в 2011г.

Подписано к печати 07.02.2012г. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Плоская печать. Усл.плл. 0,93. Уч-изд.л. 0,84. Тираж 100 экз. Заказ 11700  
ИГИЛ ЮТИ ТПУ. Ризограф ЮТИ ТПУ. 652000, Юрга, ул. Московская, 17.